



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA E FÍSICA

Professor: Renato Medeiros

MAF 1292

Eletricidade e Eletrônica

NOTA DE AULA II

Goiânia 2014

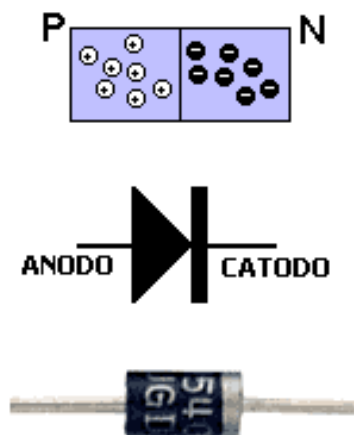
Diodos Retificadores

Aqui trataremos dos métodos de aproximação dos diodos. A aproximação a ser usada dependerá do que você pretende fazer. Após o estudo deste capítulo, você deverá ser capaz de:

- Desenhar o símbolo do diodo e identificar o catodo e anodo;
- Desenhar a curva do diodo e identificar todos os seus pontos;
- Descrever as características de um diodo ideal, da segunda e da terceira aproximação;
- Montar os retificadores de meia onda, de tomada central e em ponte.

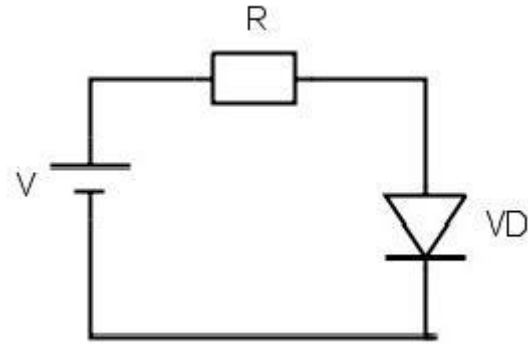
O símbolo Esquemático.

A figura abaixo mostra o símbolo esquemático de um diodo retificador. O lado P é chamado anodo e o lado N de catodo. A simbologia do diodo lembra uma seta, que indica o sentido de fluxo de corrente que circula do lado P para o lado N.



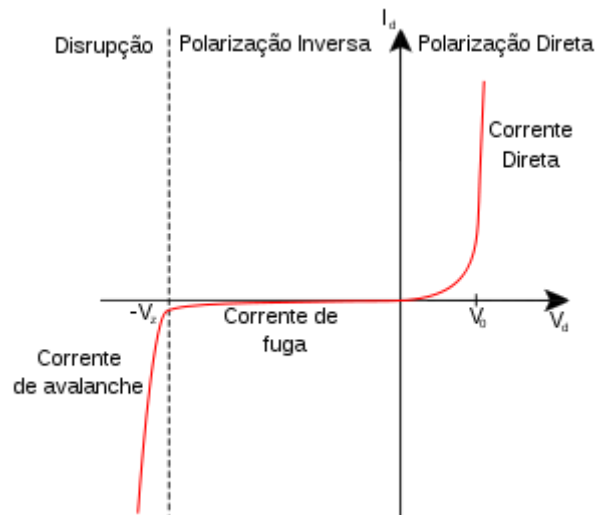
Curva do Diodo.

No circuito abaixo a primeira coisa a ser feita é identificar se o diodo esta polarizado diretamente (PD) ou reversamente (PR).



Polarização direta do diodo

Após identificarmos se o diodo esta polarizado diretamente ou reversamente, podemos obter a curva deste diodo conforme a figura abaixo



Tensão de Joelho.

O valor da tensão no qual a corrente começa a aumentar rapidamente é chamada *tensão de joelho* do diodo. Este valor depende do tipo de cristal que é formado o diodo. No caso do silício temos 0,7 V. já para o germânio temos uma *tensão de joelho* 0,3 V.

Resistência de Corpo.

Uma vez vencida a barreira de potencial, o que impede a corrente de fluir é a própria resistência do cristal, chamada *resistência de corpo* do diodo. Ela é dada pela soma da resistência do lado N com a resistência do lado P, ou seja,

$$r_B = r_P + r_N$$

Podemos usar a expressão abaixo para calcular este valor:

$$r_B = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1}$$

onde V_1 e I_1 são a tensão e a corrente no joelho e V_2 e I_2 são a tensão e a corrente em algum ponto acima do joelho na curva do diodo.

Por exemplo, a folha do 1N4001, fornece uma tensão direta de 0,93 V para uma corrente de 1^a. Como é um diodo de silício, sabemos que no joelho temos uma tensão de 0,7 V e uma corrente de aproximadamente 0 A. Com isso temos:

$$r_B = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} = \frac{0,93 - 0,7}{1 - 0} = \frac{0,23}{1} = 0,23\Omega$$

Máxima Corrente cc direta.

Para garantir que não iremos ultrapassar a corrente máxima, devemos colocar um resistor para limitar a corrente no diodo, chamamos este resistor de *limitador de corrente*. Quanto maior o valor desse resistor, menor a corrente no diodo. Essa resistência vai garantir que não nos aproximemos da corrente máxima.

A corrente no diodo é dada por

$$i = \frac{V_s - V}{R}$$

onde, V_s é a tensão da fonte e V_D a tensão do diodo (0,7 V ou 0,3 V dependendo se é de silício ou germânio)

Aproximações do Diodo

Diodo Ideal.

Na aproximação ideal o diodo funciona como um condutor perfeito (resistência nula) quando diretamente polarizado e como um perfeito isolante (resistência infinita) quando reversamente polarizado.

A figura abaixo mostra um diodo ideal



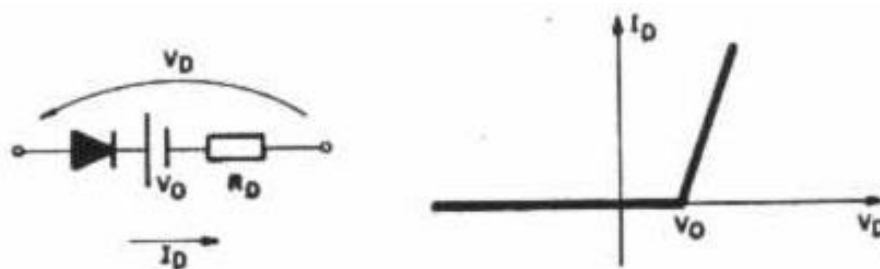
Segunda Aproximação

Desta vez podemos pensar no seguinte dispositivo: uma chave em série com uma barreira de potencial de 0,7 V. se a tensão da fonte for de pelo menos 0,7 V, a chave se fecha e temos corrente.



terceira aproximação.

Na terceira aproximação de um diodo, incluímos a resistência do corpo r_B . Nesta aproximação temos o efeito que a resistência do corpo sobre a curva do diodo



Neste caso temos a chave em série com uma bateria e mais uma resistência em série. Quando a tensão da fonte for maior que 0,7 V, o diodo conduz. A tensão total no diodo é igual a:

$$V = 0,7 + I_D r_B$$

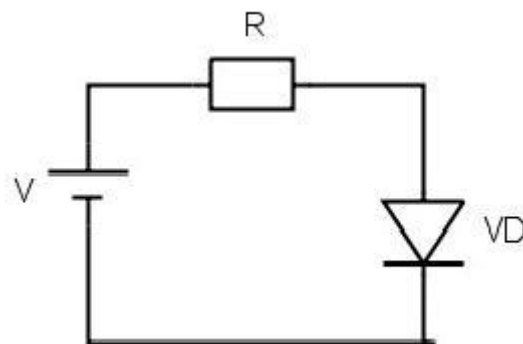
Reta de Carga

Aqui aprenderemos a calcular o valor exato da corrente e da tensão do diodo. Voltaremos a ver essas tetas no estudo dos transistores.

Equação para a Reta de Carga.

No circuito abaixo a corrente no diodo é dada por

$$I = \frac{V_s - V}{R}$$



Onde R é a resistência da fonte e vale 100Ω , $V_s = 2V$ e V é a tensão no diodo. Como esse é um circuito em série, sua corrente é a mesma em qualquer ponto do circuito.

Usaremos um exemplo simples para entender a construção da reta de carga e do ponto de operação de um diodo em um circuito para se determinar a corrente e a tensão no diodo. A equação fica da seguinte forma

$$I = \frac{2 - V}{100}$$

Esta equação é uma relação linear entre a corrente e a tensão. Tomemos o valor de $V_D = 0$, ou seja,

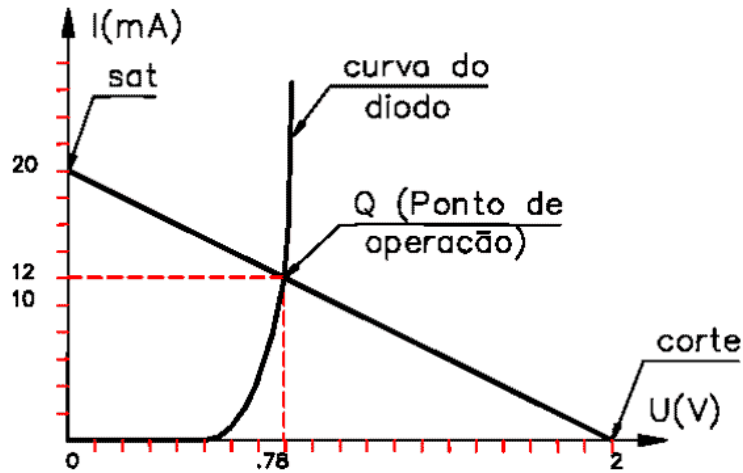
$$I = \frac{2 - 0}{100} = 20mA$$

Portanto plotamos esse ponto ($I = 20 mA$ e $V = 0 V$). Esse ponto é conhecido como ponto de saturação, porque ele representa a corrente máxima.

Tomemos agora o valor de $V = 2 V$, ou seja,

$$I = \frac{2-2}{100} = 0\text{mA}$$

Portanto plotamos esse ponto ($I=0\text{ mA}$ e $V_D=2\text{V}$). Esse ponto é conhecido como ponto de corte, porque ele representa a corrente mínima. Podemos agora traçar a reta de carga ligando esses dois pontos.



Reta de carga e ponto de operação

Para encontrarmos os valores de operação do diodo (ponto Q) traçamos a reta de carga junto com a curva do diodo. As coordenadas desse ponto nos dá a resolução simultânea da corrente e da tensão de operação do diodo em questão. Para o nosso exemplo teremos os valores de 0,78 V e 12 mA.

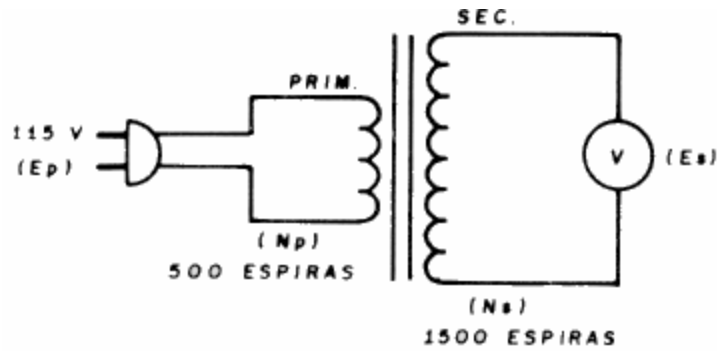
O Transformador Ideal.

As tensões fornecidas aqui no Brasil são de 127 V ou 220 V rms, dependendo da região, com frequências de 60Hz. Como esses valores são médios, temos na realidade valores indo de 139,7 V a 114,3 V rms para 127 V e variando de 242 V a 198 V rms para 220 V. podemos encontrar os valores de pico utilizando a seguinte expressão:

$$V_{rms} = 0,707V_p$$

Onde V_p é a tensão de pico.

A figura abaixo mostra um exemplo de transformador. Onde N_p e N_s são os números de enrolamentos das espiras primária e secundária do transformador, e V_p e V_s são as tensões de entrada e de saída. As linhas verticais mostram que o transformador possui um núcleo de ferro.



A equação que mostra a transformação de tensão é dada por

$$V_s = \frac{N_s}{N_p} V_p$$

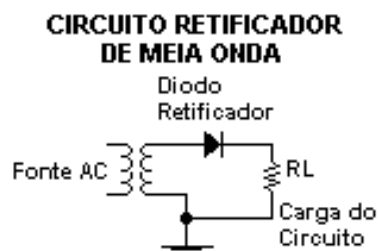
Se $N_s > N_p$ teremos o transformador elevador, se $N_s < N_p$ teremos o transformador abaixador.

Circuitos com Diodos.

Um diodo retificador é idealmente uma chave fechada quando diretamente polarizado e uma chave aberta quando reversamente polarizado. Por isso, ele é muito usado na conversão de corrente alternada em corrente contínua. Aqui veremos os três tipos básicos de circuitos retificadores.

O retificador de Meia Onda.

O circuito mais simples capaz de converter uma corrente alternada em corrente contínua é o *retificador de meia onda* (figura abaixo). Na figura podemos observar dois pontos sobre o núcleo de ferro que mostra que os terminais de entrada e de saída estão em fase, ou seja, se o primário está no semi-ciclo positivo, o segundo também estará no mesmo semi-ciclo.



Retificador de meia onda.

Vamos observar o que ocorre neste circuito. Como sabemos a corrente alternada (*ca*) possui dois ciclos: um positivo e outro negativo. Vimos anteriormente que o diodo só deixará passar

corrente se for polarizado diretamente. No primeiro semi-ciclo, positivo, teremos então o diodo polarizado diretamente e então corrente circulando por ele. Já no semi-ciclo negativo o diodo fica polarizado reversamente, e com isso não haverá corrente passando presente no circuito.

A tensão na carga na primeira aproximação é dado por

$$V_L = V_{p2} = 16,27V$$

Já para a segunda aproximação temos:

$$V_L = V_{p2} - 0,7 = 15,57V$$

Período.

A frequência do sinal de meia onda é igual á frequência de linha, ou seja, 60 Hz. Isso significa que o intervalo de tempo entre o início de um semi-ciclo positivo e o início do próximo semi-ciclo positivo, é exatamente igual ao tempo de se completar um ciclo na corrente alternada.

Valor cc ou Valor Médio.

Se você ligar um voltímetro cc no resistor de carga do retificador de meia onda, ele indica uma tensão de V_p / π , que pode ser escrito como:

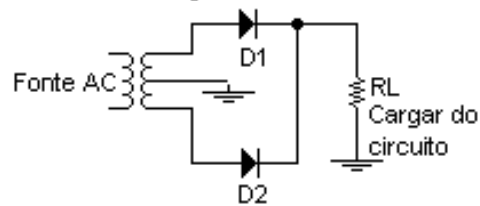
$$V_{cc} = 0,318V_L$$

Onde V_L é o sinal de pico do sinal de meia onda no resistor de carga (ou seja, tensão de carga).

O retificador de Onda Completa com Tomada Central (*centertrap*)

A figura abaixo mostra um retificador de onda completa. Esse tipo de retificador é a união de dois retificadores de meia onda (veja a tomada central). No circuito superior teremos a retificação no semiciclo positivo, enquanto o circuito inferior a retificação será no semiciclo negativo. Com isso podemos ver que D1 conduz no semiciclo positivo enquanto D2 está aberto, já no semiciclo negativo, D1 fica em aberto enquanto D2 conduz corrente.

CIRCUITO RETIFICADOR COM DERIVAÇÃO CENTRAL



Retificador de onda completa - centertrap

O valor da tensão no primário e no secundário são iguais aos valores encontrados no retificador de meia onda. Entretanto, devido a tomada central aterrada, cada semiciclo do secundário tem uma tensão com um valor apenas metade de seu valor de pico. Com isso podemos escrever, na segunda aproximação, que a tensão na carga é igual a:

$$V_L = \frac{V_{P2}}{2} - 0,7$$

Para acharmos a corrente de pico na carga, usando a lei de Ohm, teremos:

$$I_P = \frac{V_L}{R_L}$$

A Frequência de Saída.

Como agora temos Inal nos dois semiciclos com condução, a frequência do sinal de onda completa é o dobro da entrada. Por quê? A forma da onda retificada começa a repetir após um semiciclo da tensão do primário. Com isso podemos afirmar que:

$$f_{out} = 2f_{in}$$

O Valor cc ou Médio.

Ligando o voltímetro cc na carga teremos um valor médio de $2V_p / \pi$, que seria equivalente a

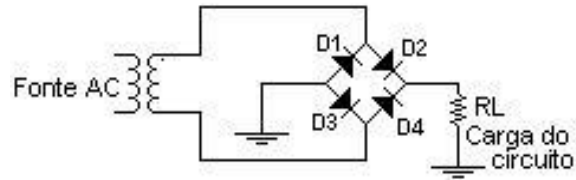
$$V_{cc} = 0,636V_L$$

Onde V_L é a tensão na carga. Essa tensão cc é o valor do sinal de onda completa porque lemos a tensão média de um ciclo completo (duas vezes de leitura).

Retificador de Onda Completa em Ponte.

A figura abaixo mostra um retificador de *onda completa*. Usando quatro diodos em vez de dois, podemos eliminar a necessidade de uma tomada central aterrada.

CIRCUITO RETIFICADOR EM PONTE



Durante o semiciclo positivo os diodos 2 e 3 estão conduzindo enquanto 1 e 4 estão em corte. Já no semiciclo negativo temos a inversão do processo, 1 e 4 passam a conduzir enquanto 2 e 3 estão em corte. Cada par de diodos em condução produz um semiciclo positivo na retificação, somando dois semiciclos positivos.

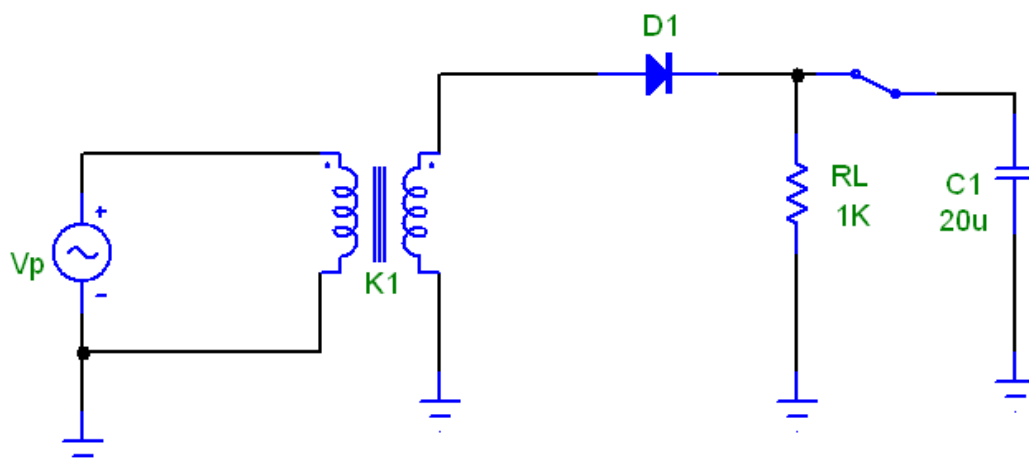
A tensão de pico na carga exatamente igual a tensão de pico do secundário (*aproximação do diodo ideal*), já na segunda aproximação teremos a seguinte relação:

$$V_L = V_P - 1,4$$

O valor 1,4 aparece pelas duas quedas de tensão nos dois diodos que estão conduzindo em cada semiciclo.

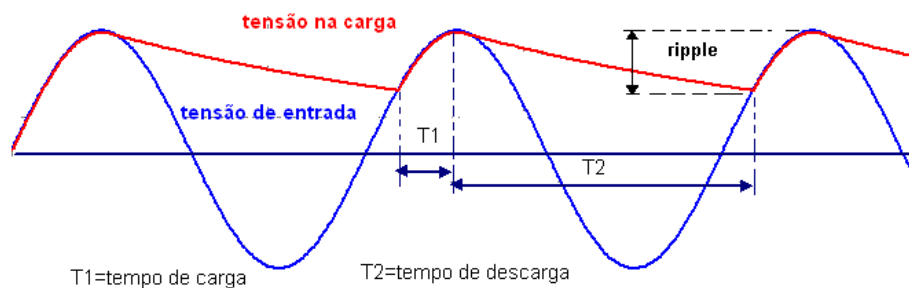
Filtrando o Sinal Retificado.

O circuito para um retificador de meia onda pode ser visto na figura abaixo:



Funcionamento:

1. Inicialmente o capacitor está descarregado.
2. Durante o primeiro meio ciclo da tensão do secundário, o diodo está conduzindo, permitindo que o secundário carregue o capacitor até a tensão de pico.
3. Logo após, no ciclo negativo, o diodo para de conduzir, o que significa uma chave aberta. Neste estágio, o capacitor, como tem uma tensão V_p polariza inversamente o diodo e começa a descarregar-se na carga (R_L).
4. O que devemos pensar é em torno da constante de tempo de descarga do capacitor, que é função de R_L e de C . Esta constante deve ser bem maior que o período T do sinal de entrada. Assim, o capacitor só de descarregará um pouco até o próximo ciclo.



A tensão na carga é agora uma tensão *cc* quase perfeita (praticamente constante). O único desvio de tensão *cc* pura são apenas ondulações causadas pelas cargas e descargas do capacitor. Quanto menor a ondulação (V_{ond}) melhor é a retificação. Podemos agora calcular o valor desta ondulação da seguinte maneira: a capacitância é definida por:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Suponha que a descarga do capacitor comece quando $t = T1$. Então, a tensão inicial pode ser escrita na forma:

$$V_1 = \frac{Q_1}{C}$$

E se a descarga terminar em $t = T2$, temos:

$$V_2 = \frac{Q_2}{C}$$

Como sabemos que a ondulação é a diferença entre as tensões de carga e descarga, podemos escrever:

$$V_{ond} = V_1 - V_2 = \frac{Q_1}{C} - \frac{Q_2}{C} = \frac{Q_1 - Q_2}{C}$$

Dividindo essa equação pela constante de tempo ($\tau = T_1 - T_2$), temos:

$$\frac{V_1 - V_2}{T_1 - T_2} = \frac{Q_1 - Q_2}{C(T_1 - T_2)}$$

Quando a constante de tempo for muito maior que o período da ondulação, o tempo de descarga é aproximadamente igual ao período T , ou seja

$$\frac{V_1 - V_2}{T} = \frac{Q_1 - Q_2}{CT}$$

Como a tensão na carga é praticamente constante, a corrente de carga é aproximadamente constante ($I = \frac{Q_1 - Q_2}{T}$), e a equação anterior se reduz a:

$$\frac{V_1 - V_2}{T} = \frac{I}{C}$$

Fazendo $V_1 - V_2 = V_{ond}$, temos

$$\boxed{V_{ond} = \frac{I}{fC}}$$

Finalmente chegamos a uma equação que você irá utilizar quando estiver verificando defeitos.

Tensão cc.

Como vamos permitir até 10% de ondulação, podemos usar uma fórmula para melhorar nossa tensão média:

$$\boxed{V_{cc} = V_L - \frac{V_{ond}}{2}}$$

Diodos Especiais

Diodo Zener

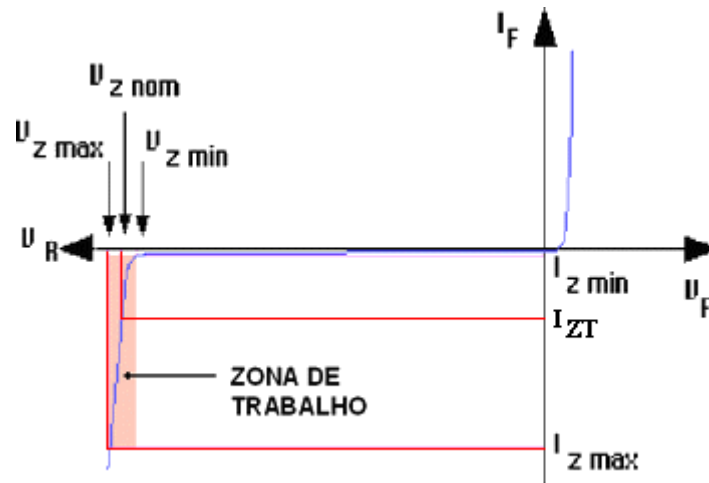
Um diodo Zener é um diodo de silício que o fabricante aperfeiçoou para trabalhar na região de ruptura. O diodo Zener quando polarizado inversamente (ânodo a um potencial negativo em relação ao cátodo) permite manter uma tensão constante aos seus terminais (V_z) sendo por isso muito utilizado na estabilização/regulação da tensão nos circuitos. Nos circuitos reguladores de tensão a parte mais importante é o diodo Zener, pois são eles que mantêm a tensão na carga praticamente constante apesar das grandes variações na tensão da linha e da resistência de carga. Os diodos Zener podem ser fabricados com tensões de ruptura entre 2 e 200 V, dependendo da dopagem dos diodos de silício.

Seu símbolo e o modelo real são mostrados abaixo:



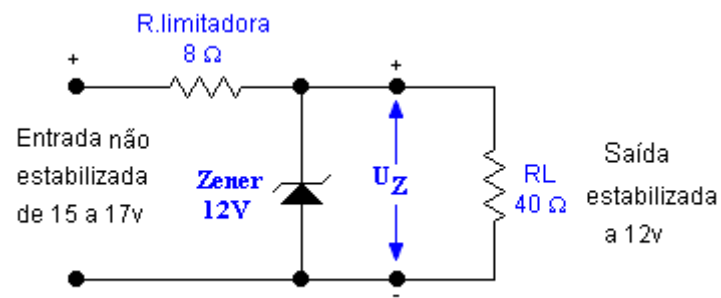
Gráfico $i \times V$

O gráfico de funcionamento do Zener mostra-nos que, diretamente polarizado (1º quadrante), ele conduz por volta de 0,7 V, como um diodo comum. Porém, na ruptura (3º quadrante), o diodo Zener apresenta um joelho muito pronunciado, seguido de um aumento de corrente praticamente vertical. A tensão é praticamente constante, aproximadamente igual a V_z em quase toda a região de ruptura.

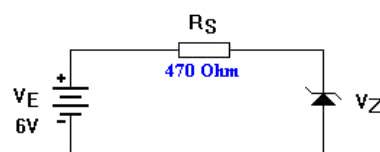


Regulação tensão

A finalidade de um regulador de tensão é manter uma saída o mais constante possível, mesmo que a corrente varie. Para que isto ocorra devemos fazer a polarização reversa do Zener (veja figura abaixo).



Para que ocorra o efeito regulador de tensão é necessário que o diodo Zener funcione dentro da região de ruptura, respeitando as especificações de corrente máxima. Para isso devemos ter uma tensão na fonte maior que a tensão Zener ($V_s > V_Z$). Para evitar que o Zener se queime, como qualquer outro dispositivo, devemos sempre colocar um resistor limitador de corrente (R_s) antes do diodo Zener.



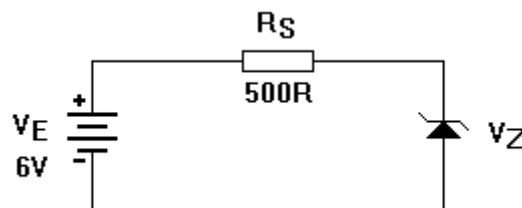
A tensão pelo resistor em série é igual a diferença entre a tensão da fonte e a tensão Zener, V_s

– V_Z . Portanto, a corrente que circula por R_S que é a corrente que circula pelo diodo Zener é dada pela fórmula:

$$I_S = \frac{V_S - V_Z}{R_S}$$

Se eliminarmos a carga no circuito acima, temos o Zener em série com o resistor e com isso teremos $I_Z = I_S$.

Para entender como funciona a regulação de tensão considere o circuito abaixo:

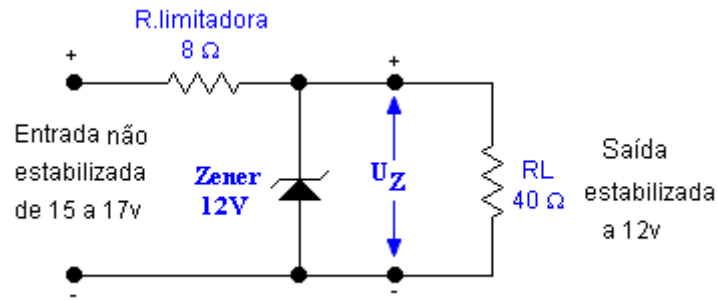


A corrente que circula por R_S que é a própria corrente que circula pelo diodo Zener é dada pela fórmula:

$$I_S = \frac{V_S - V_Z}{R_S}$$

Regulador com carga

Antes de qualquer coisa devemos verificar se o diodo Zener está em funcionamento na região de ruptura. Devido ao resistor de carga, a tensão de Thevenin que alimenta o diodo Zener é menor que a tensão da fonte. Como calcular esta tensão de Thevenin? Simples, no circuito abaixo imagine o diodo Zener retirado do circuito, o divisor de tensão permanece, formado por R_S e R_L .



Com isso podemos calcular a tensão nos pontos do Zener, ou seja,

$$V_{TH} = \frac{R_L}{R_S + R_L} V_S$$

Para o funcionamento na região de ruptura o diodo Zener, V_{TH} deve ser maior que V_Z . Esta é a primeira relação que você deve observar no circuito regulador.

Colocando a carga no circuito, podemos facilmente notar que agora temos a corrente de série diferente da corrente que passa pelo diodo Zener ($I_S \neq I_Z$). Devido a isso devemos agora calcular a corrente na carga e a corrente no diodo.

Como a resistência Zener tem essencialmente um efeito muito pequeno, podemos numa boa aproximação igualar a tensão de carga a

$$V_L = V_Z$$

Isto nos permite usar a Lei de Ohm para calcular a corrente que passa pela carga

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{V_Z}{R_L}$$

Como temos duas malhas, podemos usar a lei dos nós e descobrir a valor da corrente que passa pelo diodo Zener

$$I_S = I_Z + I_L$$

$$I_Z = I_S - I_L$$

Esta é a corrente que passa pelo diodo Zener e ela deve ser sempre menor que o valor máximo permitido pelo diodo Zener ($I_{Zmáx}$).

Ondulação no resistor de carga (V_R).

Em um retificador com filtro capacitivo podemos colocar um diodo Zener para melhorar o sinal de saída.

Tomemos uma fonte de alimentação produzindo uma tensão média com certa ondulação (V_{Rin}). Como já falado, idealmente a ondulação na saída deve ser igual a zero ($V_{Rout}=0$), mas isso não acontece. Desta maneira podemos calcular a tensão de ondulação de saída do Zener da seguinte maneira:

$$V_{Rout} = \frac{R_Z}{R_S + R_Z} V_{Rin}$$

Esta equação fornece um valor aproximadamente preciso da tensão de ondulação de pico a pico.

LED

O LED é um diodo semicondutor (junção P-N) que quando energizado emite luz visível por isso LED (Diodo Emissor de Luz). A luz não é monocromática (como em um laser), mas consiste de uma banda espectral relativamente estreita e é produzida pelas interações energéticas do elétron. O processo de emissão de luz pela, aplicação de uma fonte elétricas de energia, é chamado *eletroluminescência*.

Em geral, os led's operam com nível de tensão de 1,6 a 3,3 V, sendo compatíveis com os circuitos de estado sólido. É interessante notar que a tensão é dependente do comprimento da onda emitida. Assim, os led's infravermelhos geralmente funcionam com menos de 1,5 V, os vermelhos com 1,7 V, os amarelos com 1,7 V ou 2.0 V, os verdes entre 2.0 V e 3.0 V, enquanto os led's azuis, violeta e ultravioleta geralmente precisam de mais de 3 V. A potência necessária está na faixa típica de 10 a 150 mW, com um tempo de vida útil entorno de 100.000 horas.